

Methoden zur Verbesserung der objektiven Beschreibung subjektiver Qualitätsurteile der Sitz- und Lenkradvibrationen im Fahrzeug

Michael A. Bellmann, Reinhard Weber, Ingo Baumann, Peter Hillebrand* und Volker Mellert

Akustik FB Physik, C. v. Ossietzky Universität Oldenburg, D-26111 Oldenburg

*Volkswagen AG, D-38436 Wolfsburg

Email: michael@aku.physik.uni-oldenburg.de

1 Einleitung

Vibrationen und Geräusche beeinträchtigen den subjektiven Komfort / Diskomfort im Fahrzeuginneren. Die Ausprägtheit dieser Größen wird in der Fahrzeugindustrie in subjektiven Beurteilungen und objektiven Messungen ermittelt.

Subjektiv-Tester („Profitester“) beurteilen im Fahrzeug beim Leerlauf die Stärke des Dröhnens und die Stärke der Sitz- und Lenkradvibrationen in Abhängigkeit von unterschiedlichen Betriebszuständen.

In dieser Untersuchung geht es um geeignete Signalparameter, die die Vibrationssignale im Fahrzeug charakterisieren und möglichst hoch mit den Subjektivurteilen korrelieren. Außerdem wird untersucht, welche Messposition optimal zur Aufnahme der Sitzvibrationen geeignet ist.

Die vorgenommenen Korrelationsanalysen vergleichen bisher eingesetzten Messgrößen für Vibrationen aus der Fahrzeugindustrie mit Signalparametern, die nach der ISO 2631-1/2 [2, 3] und der ISO 5349 [4] berechnet werden.

2 Experimentelles Setup

Korrelationsanalysen werden zwischen subjektiven Beurteilungen und objektiven Beschleunigungsparametern der Lenkrad- und Sitzvibrationen aus 12 unterschiedlichen Fahrzeugen (Benzin N=3, Diesel N=9) einer Fahrzeugklasse (Mittelklasse) durchgeführt.

Dazu wurden 19 kanalige Aufnahmen der Schall- und Vibrationssignale, zeitgleich mit den subjektiven Bewertungen, mit Hilfe von zwei Mikrofonen + Kopfhörer und fünf Beschleunigungsaufnehmern (jeweils triaxial), aufgenommen:

- Sitzvibrationen: jeweils triaxial an der Sitzschiene hinten rechts (P1) und vorne links (P2), sowie auf dem Sitz (P3) und an der Kopfstütze (P4) des Fahrersitzes.
- Lenkradvibrationen: triaxial am Lenkrad¹

Jedes Fahrzeug wird im Leerlauf in drei unterschiedlichen Betriebszuständen: a) ohne Verbraucher, b) mit Verbraucher und c) mit Verbraucher und Klimaanlage (falls vorhanden) vermessen.

2.1 Objektive Signalparameter für Vibrationen

Zunächst werden die aus der ISO 2631-1/2 und ISO 5349 bekannten Beschleunigungsparameter und Standard-skalenwerte zur subjektiven Beschreibung der Lenkrad- und Sitzvibrationen berechnet:

- Effektivwert a'_V und a_V der *spektral ungewichteten / gewichteten* (nach ISO 2631-1/2 [2, 3] für Ganzkörper-vibrationen (GKV) bzw. ISO 5349 [4] für Hand-Arm Vibrationen (HAV)) Gesamtbeschleunigung (Gl. 1).
- Effektivwert a_z und $a_{w,z}$ (Gl. 1: $k_x=k_y=0$ bzw. Gl. 2) der *spektral ungewichteten / gewichteten* Beschleunigungen in z-Richtung.

$$(a_V) \text{ bzw. } a'_V = \left[k_x a_{(w),x}^2 + k_y a_{(w),y}^2 + k_z a_{(w),z}^2 \right]^{1/2} \quad (1)$$

$$\text{mit } a_w = \left[\frac{1}{T} \int_0^T a_w^2(t) dt \right]^{1/2} \quad a = \left[\frac{1}{T} \int_0^T a^2(t) dt \right]^{1/2} \quad (2)$$

a_w bzw. a sind die *spektral gewichtete / ungewichtete* Beschleunigungen (Effektivwert) in x, y oder z-Richtung.

W sind die spektrale Wichtungsfunktionen aus der ISO 2631 und 5349

Die spektralen Wichtungsfunktionen (nach ISO 2631-1 und ISO 5349) basieren auf psychophysikalischen Experimenten und weisen z.B. auf eine höhere Sensitivität des Menschen auf vertikale (z-Richtung) Ganzkörpervibrationen hin.

Diese vier Parameter (gewichtete / ungewichteten Gesamt- und z-Beschleunigungen) werden in ausgesuchten Frequenzbändern um dominante Motorordnungen (MO), die aus dem Spektrum bekannt sind, berechnet:

- $\Delta B_1 = [0 < f < 500 \text{ Hz}]$ – gesamtes Spektrum
- $\Delta B_2 = [10 < f < 35 \text{ Hz}]$ – von der 1^{ten} bis 2^{ten} MO
- $\Delta B_3 = [20 < f < 35 \text{ Hz}]$ – um die 2^{te} MO
- $\Delta B_4 = [35 < f < 100 \text{ Hz}]$ – von der 4^{ten} bis 6^{ten} MO
- $\Delta B_5 = [73 < f < 100 \text{ Hz}]$ – um die 6^{te} MO (nur Lenkradvib.)

Die Analysen der Sitz- und Lenkradvibrationen werden getrennt nach Diesel- und Benzin- Modellen vorgenommen.

2.2 Subjektive Beurteilung

Bei den subjektiven (Dis-) Komfortbewertungen der Profitester handelt es sich um Kategorialurteile in Form von Noten auf einer festen Skala. Für ein Fahrzeug im Leerlauf werden die Vibrationen des Sitzes, die Vibrationen des Lenkrades und das „Dröhnen“ bei den drei Betriebszuständen zeitgleich zu den Aufnahmen beurteilt.

3 Ergebnisse der Korrelationsanalysen

3.1 Sitzvibrationen

Für die Benzin- Modelle ($n_b=9$) korreliert der Parameter a'_V (spektral ungewichtete Gesamtbeschleunigung) aus breitbandigen Beschleunigungssignalen signifikant mit den subjektiven Benotungen eines erfahrenen Testers (Tabelle 1), für die Diesel- Modelle ($n_d=26$) hingegen nicht. Ähnlich hohe signifikante Korrelationskoeffizienten ergeben sich auch für die spektral begrenzten Beschleunigungsparameter von der 1^{ten} bis 2^{ten} MO und um die 2^{te} MO. Bei den Diesel- Modellen ergeben sich erst durch die spektrale Begrenzung um die dominante 2^{te} MO Beschleunigungsparameter, die signifikant hohe Korrelationskoeffizienten liefern (Tabelle 1). Dies deutet auf die Wichtigkeit dieses tieffrequenten Bereichs für die subjektive Komfortbeurteilung der Sitzvibrationen bei diesem Fahrzeugtyp hin.

Vergleicht man die gewichtete, sowie ungewichtete Gesamtbeschleunigung a'_V und a_V mit den z-Beschleunigungen (a_z und $a_{w,z}$), so kann man generell höhere Korrelationskoeffizienten bei den objektiven Parametern, die Vibrationen aller drei (x-, y- und z-) Richtungen berücksichtigen, feststellen.

Der Aufnahmepunkt der Sitzvibrationen ist ebenfalls entscheidend und ist fahrzeugtypabhängig. Bei diesen Modellen ist die Position P1 optimal, ähnlich wie in [1].

Die höchsten Korrelationskoeffizienten erhält man, wenn man die objektiven Parameter aus einer geeigneten Gewichtung der Vibrationen in x-, y- und z-Richtung (Gl. 1 Variation von k_x , k_y und k_z) berechnet werden (Abbildung 1). Diese Ergebnisse zeigen, dass die Vibrationen aus den drei Raumrichtungen unterschiedlich großen Einfluss auf die Beurteilung des Sitzkomforts in diesem Fahrzeugtyp besitzen. Eine psychophysikalisch motivierte spektrale Gewichtung der Teilbeschleunigungen verbessern die Korrelationskoeffizienten nochmals deutlich.

Eine Analyse getrennt nach Diesel- und Benzin- Modellen erhöht die Korrelationskoeffizienten deutlich. Jedoch ist die

¹ Koordinatensystem: x' - Achse zeigt in Richtung der Lenksäule.

unterschiedliche Bewertung (Abbildung 1) der Benzin- und Diesel- Modelle nicht alleine mit spektralen Eigenschaften der Sitzvibrations-signale erklärbar.

Motorordnung (MO)	Gesamter Bereich		1 ^{te} - 2 ^{te} MO		2 ^{te} MO	
	B	D	B	D	B	D
ungewichtete Gesamtbeschl. (Gb)	-0.92 ***	-0.07	-0.72 *	-0.65 ***	-0.65	-0.64 ***
gewichtete Gb mit Variation von k_x , k_y und k_z	-0.90 ***	-0.86 ***	-0.84 **	-0.80 ***	-0.78 *	-0.75 ***

Tabelle 1: Korrelationskoeffizienten² zwischen den spektral ungewichteten / gewichteten (mit geeigneter Gewichtung von k_x , k_y und k_z) Gesamtbeschleunigungen und den subjektiven Beurteilungen für die gemessenen Sitzvibrationen an der Messposition „P1“.

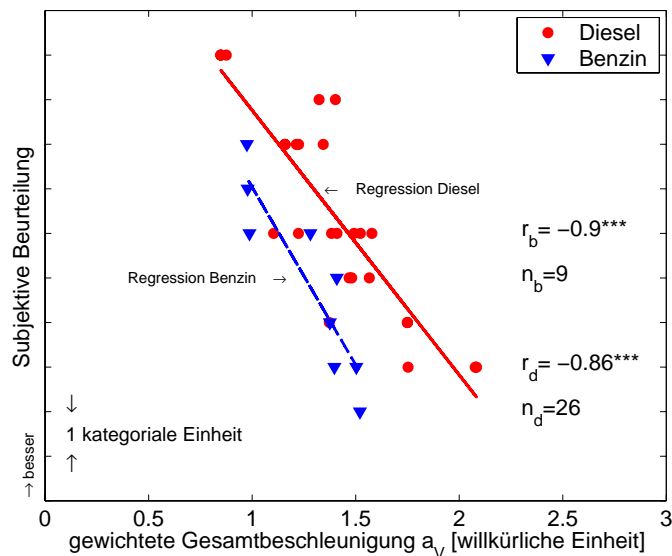


Abbildung 1: Relationen zwischen der spektral gewichteten Gesamtbeschleunigungen a_v im gesamten Frequenzbereich mit geeigneter Gewichtung der drei Raumrichtungen³ und den subj. Komfortbewertungen der Sitzvibrationen, gemessen an der Messposition „P1“.

3.2 Lenkradvibrationen

Bei den Lenkradvibrationen zeigen die Analysen signifikante Korrelationskoeffizienten zwischen allen berechneten Parameter und den subjektiven Benotungen (Tabelle 2) bis auf Parameter aus dem Bereich 35-100 Hz. Die Korrelationskoeffizienten zwischen Signalparametern aus dem Bereich 73 - 100 Hz (6^{te} MO) und den subjektiven Urteilen sind wieder signifikant, so dass nicht nur tieffrequente Anteile um die 1^{te} bis 2^{te} MO, wie bei den Sitzvibrationen, wichtig für die Beurteilung der Lenkradvibrationen sind.

Durch eine psychophysikalisch motivierte spektrale Gewichtung der Signale lassen sich die Korrelationskoeffizienten verbessern (Tabelle 2). Jedoch liefert die spektrale Hand-Arm Wichtung, die eigentlich bei der Beurteilung der Lenkradvibrationen die naheliegende ist, weniger gut korrelierende Parameter mit den subjektiven Komforturteilen, als die spektrale Gewichtung für Ganzkörpervibrationen, siehe Abbildung 2. Diese weisen im Gegensatz zur Hand-Arm Wichtung auf eine höhere Sensitivität des Menschen auf vertikale (z-Richtung) Vibrationen hin und gewichtet die tiefen Frequenzanteile noch stärker als die Wichtungsfunktionen für die Hand-Arm Vibrationen.

Triaxiale Parameter, die die Vibrationen aller drei Raumrichtungen berücksichtigen (a_v' und a_v), liefern deutlich höhere Korrelationskoeffizienten mit den subjektiven Komfort-

beurteilungen der Lenkradvibrationen, als axiale Parameter. Die Diesel- und Benzin- Modelle werden unterschiedlich bewertet. Diese Abweichungen sind nicht ausschließlich mit spektralen Eigenschaften der Lenkradvibrationen erklärbar.

Motorordnung (MO)	Gesamter Bereich		1 ^{te} - 2 ^{te} MO		2 ^{te} MO	
	B	D	B	D	B	D
ungewichtete Gesamtbeschl.	-0,67 *	-0,47 *	-0,65	-0,40 *	-0,65	-0,39 *
gew. (GKV) Gesamtbeschl.	-0,73 *	-0,56 **	-0,74 *	-0,50 **	-0,74 *	-0,50 **
gew. (HAV) Gesamtbeschl.	-0,65	-0,50 **	-0,65	-0,45 *	-0,65	-0,44 *

Tabelle 2: Korrelationskoeffizienten r zwischen den spektral ungewichteten / gewichteten (mit GKV- und HAV-Wichtungen) Gesamtbeschleunigungen und den subj. Beurteilungen für die gemessenen Lenkvibrationen.

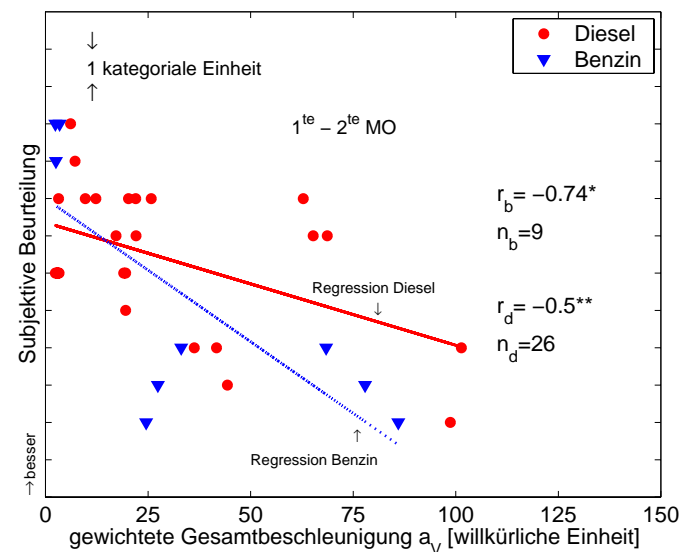


Abbildung 2: Dargestellt sind die spektral gewichteten Gesamtbeschleunigungen (mit GKV Gewichtung) im Frequenzbereich um die 2^{te} MO als Funktion der subjektiven Beurteilungen der Lenkradvibrationen.

4. Zusammenfassung / Schlussfolgerungen

Signalparameter, berechnet nach der ISO 2631-1/2 und ISO 5349, die die unterschiedliche spektrale Sensitivität des Menschen für Ganzkörper- sowie Hand-Arm Vibrationen berücksichtigen, beschreiben das subjektive Komfortempfinden besser, als spektral ungewichtete Signalparameter. Für die Sitzvibrationen lässt sich ein objektiver Parameter noch optimieren, in dem die räumlichen Anteile der x-, y- und z-Richtung (Variation von k_x , k_y und k_z) geeignet gewichtet werden (siehe auch Studie [1]).

Zusätzlich erweist sich der Frequenzbereich um die 2^{te} MO als wesentlich für die Beurteilung der Lenkrad- und auch Sitzvibrationen.

Die getrennte Analyse nach Benzin- und Diesel- Modellen erhöht die Korrelationskoeffizienten deutlich. Die unterschiedliche Beurteilung der Benzin- und Diesel- Modelle ist nicht ausschließlich mit spektralen Parametern für die Lenkrad- und Sitzvibrationen erklärbar.

Literatur

1. M.A. Bellmann, R. Weber, I. Baumann, P. Hillebrand und V. Mellert, *Methods for improving the objective description of subjective car vibration quality assessments*, Proc. ISMA 25, Leuven, Belgien (2000)
2. ISO 2631-1, *Evaluation of human exposure to whole-body vibration – Part 1: General requirements*, International Organisation for Standardisation, Geneva (1997)
3. ISO 2631-2, *Evaluation of human exposure to whole-body vibration – Part 2: Continuous and shock-induced vibration in buildings (1-80 Hz)*, International Organisation for Standardisation, Geneva (1989)
4. ISO 5349, *Mechanical Vibration - Guidelines for the measurement and assessment of human exposure to hand-transmitted vibration*, International Organisation for Standardisation, Geneva (1989)

² Statistisch signifikant: * - 5%, ** - 1% und *** - 0.1% Niveau

³ Variation von k_x , k_y und k_z